

衝撃波研究の新展開

特集 プロジェクト研究

近藤 建一* , 中村 一隆**
吉田 正典***, 田中 和夫****

Emergent evolution in the shock-wave research

Key Words : shock wave, Laser, Equation of state New material,
High speed phenomena

1. はじめに

科学技術振興事業団の戦略的基礎研究推進事業における研究領域「極限状態における現象」に対して、衝撃波面形成過程と新化学反応プロセスと題するテーマを応募したところ、第1期の研究課題として採択され、2001年3月までの予定でプロジェクト研究を進めている。

物質を衝撃圧縮して何らかのプロダクトを直接生産することは、ダイヤモンドの衝撃合成や金属を張り合わせるクラッド材などを除けば、一般の産業ではほとんど無縁の特殊な世界といえるかもしれない。しかしながら、衝撃波の伝播現象やそれに伴う衝撃圧縮状態は、物質のもつ非線形な性質を反映したもので、現実に行っている物理的・化学的事象に対して少し距離を置いてみると、むしろ普遍的・一般的であることが分かる。しかも、衝撃現象は、粉末

を成形したり金属を加工するような現在の産業で利用されている領域から、地球科学や宇宙物理学で扱う超高压力・超高温度といった極限状態まで、単純な法則で理解することができる。ところが、もう一步踏み込んだ理解や利用を企てた途端に、多くの困難に出会ってしまう。それは、衝撃波の本質である衝撃波面について、計測の困難さ故に、波面をブラックボックスとし、不連続面として単純に扱っているからである。

本プロジェクトでは、衝撃波面を超高压力・超高温度・超加速度という特性に加えて、それらが空間的・時間的に極端な勾配をもったパルス反応場であるとみなし、衝撃波面そのものを未開拓の極限環境として位置づけ、赤外光からX線域に互る実時間衝撃波診断技術を開発しながら、その定量的表現を試みるとともに、新物質創製の新しい方法論の構築を目指している。



*Ken-ichi KONDO
1948年2月23日生
1976年東京工業大学大学院理工学研究
科化学工学専攻博士課程修了
現在、東京工業大学・応用セラミック
ス研究所、教授、工学博士、高压力材
料科学
TEL 045-924-5342
FAX 045-924-5360
E-Mail kondol@rlem.titech.ac.jp



***Masataka YOSHIDA
1951年8月29日生
1981年東京大学大学院工学系研究科
反応化学専攻博士課程修了
現在、工業技術院物質工学工業技術研
究所、高エネルギー化学研究室、室長、
工学博士、高密度エネルギー工学
TEL 0298-54-4792
FAX 0298-54-4783
E-Mail yoshida@nimc.go.jp



**Kazutaka G. NAKAMURA
1960年3月13日生
1989年東京工業大学大学院理工学研究
科原子核工学専攻博士課程修了
現在、東京工業大学・応用セラミック
ス研究所、助教授、工学博士、表面反
応ダイナミクス
TEL 045-924-5397
FAX 045-924-5360
E-Mail nakamurz@rlem.titech.ac.jp



****Kazuo TANAKA
1951年4月4日生
大阪大学工学部電気工学科卒業
現在、大阪大学大学院工学研究科・
電子情報エネルギー工学専攻、助教授、
Ph. D.、プラズマ物理・レーザー核融
合
TEL 06-6879-7233
FAX 06-6877-4799
E-Mail katanaka@ile.osaka-u.ac.jp

本プロジェクトは現在進行形であるので、本稿では計画の背景と概要、および成果の一端を紹介したいと思う。

2. 研究チーム構成

近藤をプロジェクト全体の研究代表者として、東工大でひとつの研究グループを構成し、物質研・吉田グループおよび阪大・レーザー研・田中グループの3グループでチームを構成している。東工大・応セラ研をチーム全体の中央研究場所としており、各グループが独自のテーマで研究を進めて総合化するというよりも、それぞれの設備と人材を生かしながら、有機的な強い相互作用のもとに研究を進めている。

3. 研究の背景

凝縮系物質中を音波が伝わる現象は、応力と歪みを介して、運動量とエネルギーが他端に伝わる現象である。音波の速度は応力が高いほど速いので、伝播とともに応力波形が切り立ってくる。応力がある限界を越えると、塑性変形や破壊のような物理的な現象、原子結合の変化や原子組み替えのような化学的な現象、あるいは光や熱の放射のようなエネルギーの形態変換の現象など、媒質自身の変化や応力の伝わり方の変化を引き起こしながら、応力と歪みが波動として伝播する。このような強い応力波は、厳密には種々の伝播形態に分類されるが、一般には衝撃波と呼ばれる。強い応力波の伝播には、物質のもつ非線形な性質によって、瞬間的に状態が変化する衝撃波面を伴うことが多いからである。

逆に見れば、強い圧縮パルスを物質に加えて衝撃波を発生させ、その波面の形成過程や伝播特性を調べることにより、通常環境では知ることのできない潜在的な非線形な物性や化学反応性を顕在化させることができるのである。

しかしながら、1ナノ秒以下の短時間の衝撃波面での励起過程とそれに続く衝撃圧縮の定常状態に至る緩和過程の情報が全く得られていない。しかも、物質と衝撃波との波面における相互作用は、高圧力パルスによる原子または分子の加速の過程で起こるので、第一段階としては純粋に力学的なものであり、原子の移動とエネルギーの移動・変換速度との競合もしくは釣り合いの問題と関係している。これは、レーザー化学などが対象とする一般の熱励起あるいは

光吸収励起による反応過程とは著しく異なっており、ユニークな励起機構・反応機構が存在していると期待される。しかしながら、衝撃波と凝縮系物質との相互作用は、現象の持続時間が短い不可逆な単発現象であることのみならず、作用領域と外界との間に大きな圧力・温度勾配が存在することなどの理由によって、その場観測には大きな困難が伴い、研究の進展が阻まれている。

一方、衝撃波面内での励起と緩和のプロセスが明らかでない現状であっても、衝撃圧縮法は既に新材料や新物質を数多く生み出している。例えば近藤らの開発した衝撃焼結法によって、単磁区ナノ組織磁石やナノ組織ダイヤモンド多結晶体が作られ、また、やはり近藤らが開発した衝撃圧縮凍結法(SCARQ)によって新しい準安定炭素相(n-ダイヤモンド)や相転移過程凍結相(アモルファスダイヤモンドやナノクリスタリンダイヤモンド)が作られている。これら新炭素相は衝撃波面での励起後の比較的長い時間(サブマイクロ秒)での緩和過程を含めて凍結されたものと解釈されているが、衝撃波面でどのような励起過程と反応過程によってもたらされたものかは推測による他はない。情報の不足が、物質科学研究の汎用ツールとしての衝撃圧縮法の可能性を狭くしているといえよう。

また、数年前から英国と米国において、高強度レーザーのアブレーション反作用を用いた新しい研究手法が普及し始めてきた。わが国でも、田中らレーザー核融合などの研究グループの高い活力があるが、これまで凝縮系衝撃圧縮の研究者が取り扱ってきた領域への応用例は皆無に等しい。レーザーショックと称するこの衝撃圧縮法は、分光学的なその場観察とピコ秒クラスのタイミングが取り易いことやテーブルトップ装置でのテラパスカル領域の超高压実験が可能なことなど、従来の衝撃法とはイメージを一新する数々の利点がある一方、衝撃波としての安定性や平面性、あるいはその進展過程などに多くの未解決な問題を含んでいる。

4. 研究計画の概要

本研究では、いくつかの新しい衝撃波の発生方法と診断方法の開発を行う。図1に研究全体を手法によって分類して示した。

すなわち、従来の衝撃銃を用いた方法から、パルスレーザーの特徴を生かした衝撃波研究法へ軸足を

Diagnostics	Shock-Wave generation			
	Gun	— single —		Laser
Mode	single E O S (conservative)	E O S (conservative)	E O S (dissipative)	repetitive (conservative)
material velocity	DLI	ORVIS	ORVIS	
electric emission	polarization IR/V	IR/V	UV/X-ray	IR/V/UV/X-ray
X-ray probe		diffraction shadowgraph	microscope pin-hole	diffraction
laser probe	CARS	CARS		CARS/Raman
SHG/SFG				SHG/SFG
laser pump				Heat, Photons
Cryostat			H2/D2	
Recovery	SCARQ	SCARQ	Rad.Cool Sputtering	multiple repetitive

図 1

シフトする。レーザー法には、在来法よりもはるかに高いエネルギー密度が得られ、その領域が広く制御性が高いこと、時間幅の短時間性と高い自由度、診断装置と衝撃波発生との易同期性及び同期プローブ光発生が可能なこと、ターゲットの微細化など、多くの特徴があるからである。

言い換えれば、在来の衝撃圧縮法が静的圧縮法の大型プレスに対応するとすれば、レーザー衝撃圧縮法はダイヤモンドアンビルセル(DAC、宝石級のダイヤモンドの微細な先端で試料を圧縮する装置で、地球中心近くの状態を実現できる)の特徴に似ており、静的圧縮のDACによる革命と同じことが衝撃圧縮においても起こり得ることが明らかである。すなわち、高圧力研究の手法が大型のプレスに依存した特殊な世界から脱却し、一般の物性研究者がダイヤモンドアンビル装置によって圧力パラメータを身近にしたように、衝撃圧縮法が一般化して圧力軸・温度軸とともに不可逆過程に対する時間軸を身近なものとする一つの方法と考えられ、ダイヤモンドアンビルが高圧力研究の世界観を変えたのと同様な影響をもたらす重要な技術である。

また、パルスレーザーのもつ繰り返し特性を利用することにより、単発現象でしか有り得なかった従来の衝撃法の概念を一新することが可能である。すなわち、くり返し衝撃圧縮法では、衝撃波を圧力・温度パルスによるポンピング(励起)と捉えると、いわゆるポンプ・プローブ法による多光子励起などの研究手法ときわめて近く、他分野の研究者と共有し得る技術や現象が極めて多いことが分かる。そうした共通項に加えて、結晶格子・分子への力学的・熱

的パルス励起とその緩和現象というユニークさがあり、さらに、衝撃圧縮の本質としての不可逆過程が含まれているので、物質移動を伴う物質ダイナミクスの空間的・時間的パスを明確に記述することが最も重要な目標といえる。

しかしながら、依然として衝撃圧縮の在来法とレーザー法の住み分けすべき研究領域がある。それは、静的圧縮においてもDACが万能ではなく、圧力勾配や温度勾配などの問題を含むだけでなく、依然として大型プレスに重要な役割があるのと同様である。さらに、在来法の実験データとの比較性・連続性を考慮すると、レーザー照射によって発生する衝撃波を在来法の衝撃波と単純に置き換えることは極めて危険であり、化学反応や相転移の研究では、本質的な差異が予想される。本研究では、このような手法間のデータ連続性を意識しつつ、状態方程式に基礎を置いての精密化及び圧力領域拡大の研究を進めており、さらに、ピコ秒X線回折法やラマン分光法などの新しい診断手法の開発を進めている。

5. 大型装置による状態方程式及び飛翔体加速

超高圧力領域での物質の状態を実験的に調べることは、レーザー核融合、新物質創成、宇宙物理などの学問分野において非常に重要なデータを与え、またその理解にも大きく貢献することができる。大阪大学が分担する主要部分は、大型レーザー装置(激光十二号ガラスレーザー装置、レーザービーム数:12、出力:8kJ、レーザー波長:1 μ m, 0.53 μ m, 0.35 μ m、レーザー光パルス幅:0.1-5ナノ秒、集光強度:10¹³-10¹⁵W/cm²)を用いた状態方程式研究においてその手法を確立し、重水素、プラスチック、炭素、ダイヤモンドなどの重要な基礎物質において標記圧力領域における正確な状態方程式データを取得することである。

レーザー光線を物質に照射し、プラズマを生成する過程で発生するアブレーション(噴出)圧力は、照射した物質内部に衝撃波を送り込み、衝撃波後面での達成圧力は、100メガバールを超えることができる。また、実験そのものもレーザー光システムがクリーンルーム内で管理され、生成プラズマの規模もせいぜい、数mmのスケールでありこれまでの状態方程式研究とは、全く様相を異にしている。計測としては、衝撃波速度、衝撃波を送りだすピストン速度、衝撃波温度などを正確(%以下の誤差)に独立

に測定することが必要となる。衝撃波速度は、通常平板の被観測対象物質(たとえばプラスチックの5mm角の板)にレーザーを照射し、衝撃波が平板裏側に抜けた際に発生する衝撃波面からの黒体放射のタイミングを観測することで測定できる。同様にピストン速度は、高速度のフラッシュx線を当てて、物質の透過像を観測することで判る。レーザーにより誘起される衝撃波実験が万能かという一つややこしい問題を抱えている。これは、レーザー光により生成されたプラズマからエネルギーの高い電子(高速電子)やx線が発生することである。高速電子は、その平均自由行程が長くこれから調べようとする物質を先に暖めてしまう(前駆加熱)。これが起こると物質の初期温度が変わってしまい測定精度に影響を及ぼすためにこれをできるだけ抑制する必要がある。抑制するには、レーザー集光強度を下げるか被観測物質に高い原子番号の物質による層をもうけて高速電子を止めてやるなどの工夫が必要である。さらに、最近の実験で、全く新しい概念を導入した多層膜構造のフライヤを高速で飛ばすことに成功し、これを用いることにより前駆加熱の問題なく状態方程式実験が行える。フライヤー技法は、これまでの状態方程式実験で使用されてきたものであるが、これをレーザー誘起衝撃波実験に応用することで非常に精度の高いデータが取得出来ることになる。多層膜フライヤ物質は、高い原子番号の物質を層として持ち、さらに被測定対象物質と距離をおくことが出来るために高速電子の影響を大幅に抑えることができる。

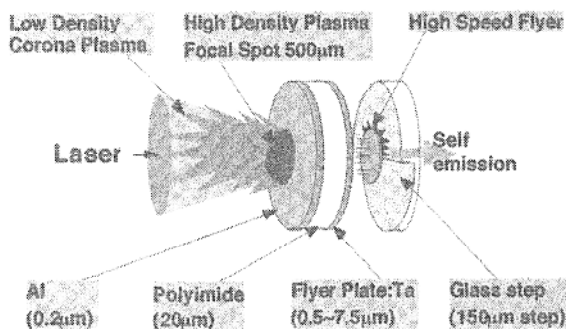


図2 フライヤー概念図

図2は、多層膜フライヤーの概念図を示す。レーザーが照射された側から衝撃波がポリイミドの中に伝わり、タンタル層に伝わる。タンタル層の中では、衝撃波と希薄波が交互にプラスチック層の中にある衝撃波とぶつかりその度にタンタル層は、加速を受ける。ポリイミド層は、高い衝撃波により爆発的に膨張しさらにタンタル層を加速する。図3は、実験データを示す。実験では図2のように高速で飛翔するフライヤーを硝子のステップにぶつけ、そこから発光する光を空間時間分解して計測した。このレーザーショットでは、2µmのタンタル箔が実に20km/秒以上の速度で直径350µm以上のほぼ完全な平面性を維持して飛翔したことが確認された。重水素などの状態方程式研究に使用していくために必要な速度を十分に確保している。

6. おわりに

本プロジェクトも中盤となり、新しく開発した装置が稼働を始めている。例えば、金属への短パルスレーザー(テラワットレーザー)照射によって、数ピコ秒の硬X線パルスをプローブ光として発生することができ、物質の格子位置の変化をX線結晶学的解析によってピコ秒時間分解能で追跡することが可能となってきた。これらの新しい手法は、衝撃波の研究だけでなく、温度・圧力・時間をパラメーターとした新しい物質科学分野、すなわち物質ダイナミクスとも言うべき研究領域への糸口となることが期待されるものと言えよう。

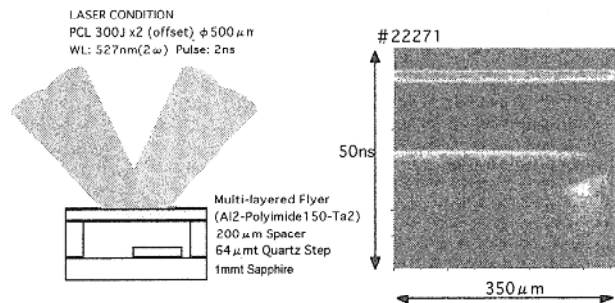


図3 フライヤー測定結果
硝子ステップにぶつかる際の発光時間差からフライヤー速度がわかる。